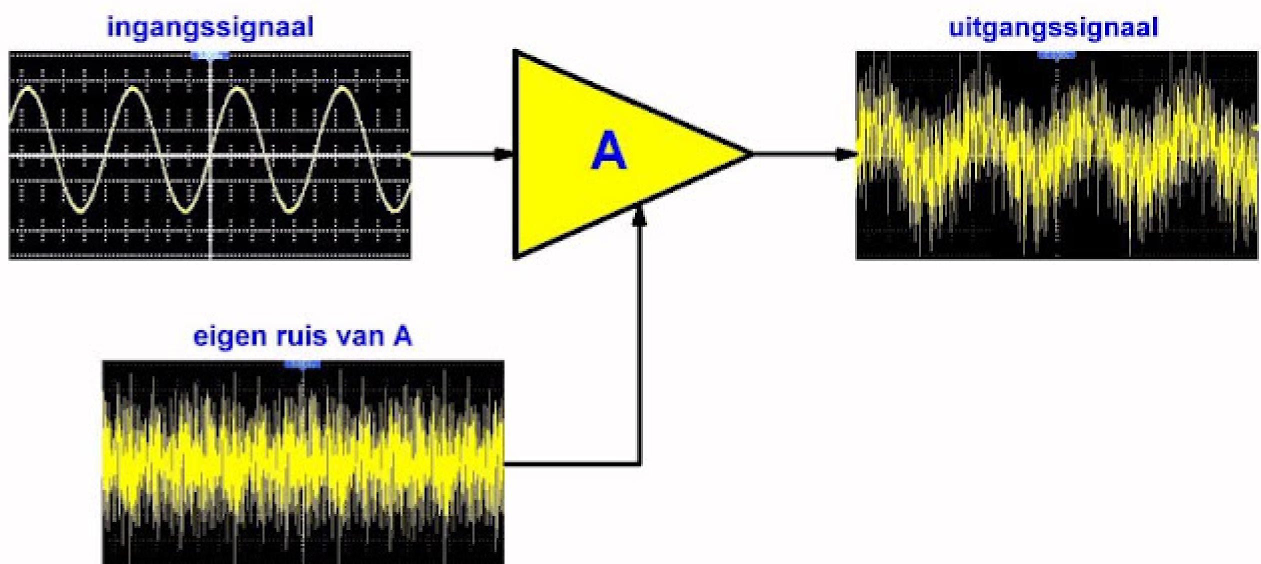
Parallel versterkers

Als u uiterst kleine signalen analoog moet versterken komt het er op aan zo ruisvrij mogelijke schakelingen te ontwerpen. Dan kunnen parallel-versterkers met ruisarme transistoren van pas komen.

Auteur: Jos Verstraten, Landgraaf, Nederland
Email: josverstraten@live.nl
Publicatiedatum: 05-12-2019

Achtergrondinformatie over ruis

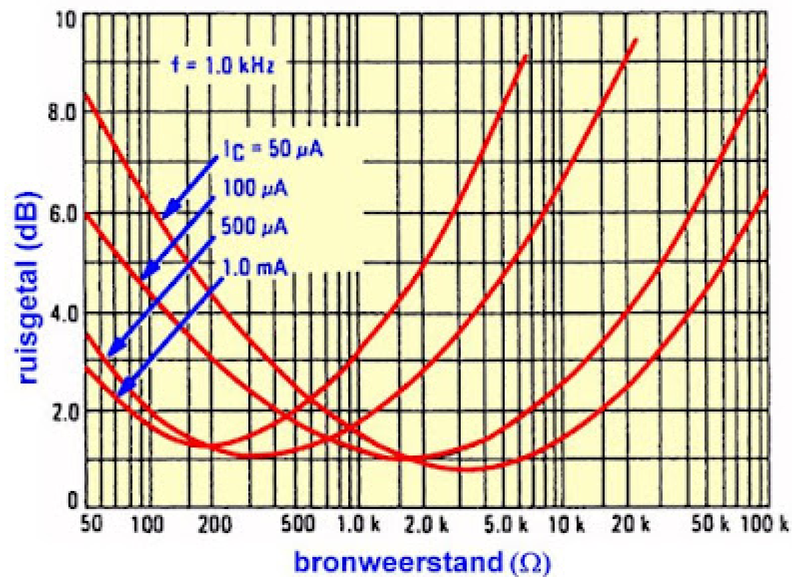
Waarom ruisvrij ontwerpen?
Als u heel kleine wisselspanningssignalen, bijvoorbeeld van moving coil elementen, wilt versterken moet u zo ruisvrij mogelijk ontwerpen. In de onderstaande figuur is getekend waarom dat belangrijk is. Aan een versterker A wordt een klein ingangssignaal aangeboden. U moet hierbij denken aan een signaal dat kleiner is dan 1 mV. Stel dat de versterker dit signaal honderd keer versterkt. Aan de uitgang verwacht u, in het ideale geval, hetzelfde signaal terug te vinden maar dan met een grootte van 100 mV. De versterker A produceert echter zélf een ruissignaal in zijn ingangskring(en) met een waarde van 1 mV. De versterker moet u dan als een mengversterker beschouwen die zowel het ingangssignaal als zijn eigen ruissignaal versterkt. Kortom, aan de uitgang krijgt u een mengsignaal waarin het versterkte signaal vrijwel verdrinkt in de versterkte eigen ruis van de elektronica.



Kleine ingangssignalen verdrinken in de eigen ruis van de schakeling. (© 2019 Jos Verstraten)

Ruis van transistoren
Transistoren produceren intern nogal wat ruis. Er bestaat een bepaald verband tussen de collectorstroom, de bronimpedantie en de ruis die een transistor produceert. Dit verband wordt samengevat in een karakteristiek, zie onderstaande figuur, die bij de technische gegevens van vrijwel alle transistoren wordt opgenomen.
Uit deze karakteristiek blijkt duidelijk dat de geproduceerde ruis met een factor vier kan variëren in functie van de collectorstroom. Voor een op zich ruisarme transistor als een

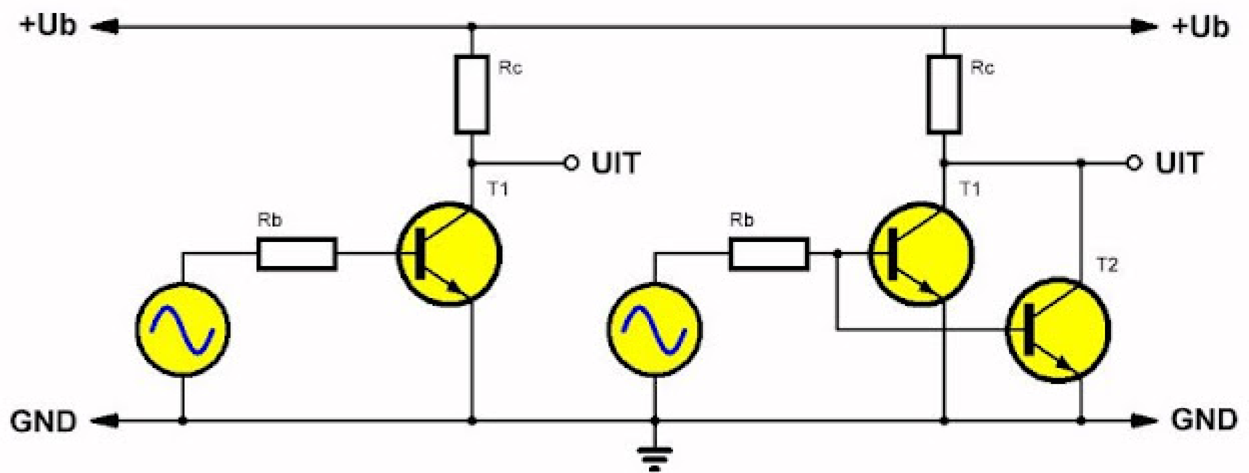
BC109 is, bij een bronimpedantie van 600 Ω, de eigen ruis van de halfgeleider het laagst als u de collectorstroom instelt op ongeveer 180 µA. Zakt de bronimpedantie tot 200 Ω dan moet u ongeveer 400 µA door de collector sturen om zo min mogelijk transistorruis te krijgen.



Het verband tussen de bronimpedantie, de collectorstroom en de ruis van een transistor. (© 2019 Jos Verstraten)

Ruis en bronimpedantie
Uit deze grafiek volgt overduidelijk dat de ruis flink toeneemt als de bronimpedantie erg laag wordt. Bepaalde bronnen, zoals de moving coil elementen van platendraaiers hebben een impedantie van een paar ohm. Deze elementen werken magnetodynamisch. Het 'spoeltje' bestaat uit een paar windingen geleidend materiaal uit een speciale metaallegering, dat aan de naald van het element is opgehangen. Het zal duidelijk zijn dat een dergelijk element een zeer lage impedantie heeft. Bovendien geeft een dergelijk element een zeer lage spanning af, 150 µV is geen uitzondering. U moet dus flink versterken, waardoor het probleem van de ruis van de eerste trap nog veel groter wordt. Die ruis wordt immers ook versterkt in de volgende trappen.
Dergelijke bronnen kunt u niet versterken met de standaard schakelingen. Zelfs microfoonversterkers produceren veel te veel ruis.

Parallelle transistoren
Dergelijke ruisproblemen kunt u oplossen door transistoren parallel te schakelen. In de onderstaande figuur wordt een enkele trap versterker (links) vergeleken met een identieke schakeling, maar nu uitgevoerd met twee parallel geschakelde transistoren (rechts). De twee transistoren worden via één basisweerstand R_b gestuurd, de collectorstromen vloeien gezamenlijk door één collectorweerstand R_c. U kunt wiskundig berekenen dat de ruis van de rechter schakeling een factor twee lager is dan de ruis van de linker schakeling.



Door het parallel schakelen van twee transistoren neemt de totale ruis met een factor twee af. (© 2019 Jos Verstraten)

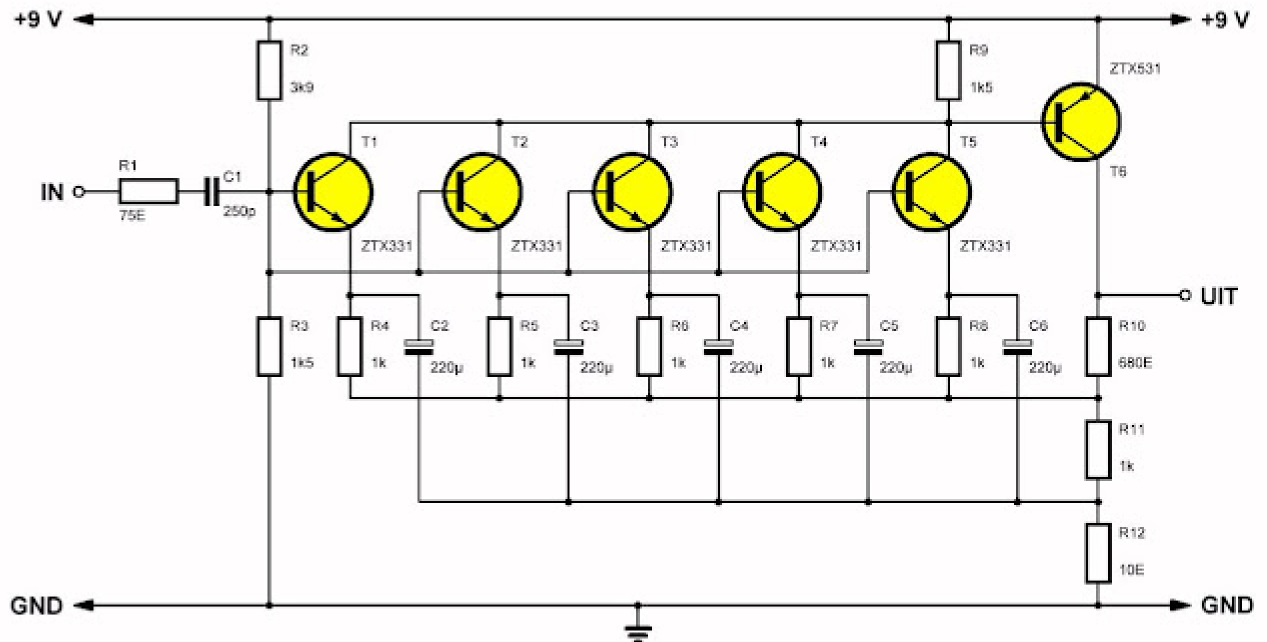
Intuïtieve verklaring
Die wiskundige berekeningen gaan hier veel te ver, maar u kunt de verklaring voor dit verschijnsel wel intuïtief aanvoelen. Ruis is immers een statistisch verschijnsel. Op het moment dat transistor T1 een positief ruispulsje over de collectorweerstand R_c opwekt kan het voorkomen dat transistor T2 een ongeveer even groot negatief ruispulsje genereert. Omdat beide signalen in de weerstand worden opgeteld zal de resulterende ruis veel lager zijn dan die van één transistor.
Het gevolg hiervan is dat de parallelle schakeling met een lagere bronimpedantie gevoed kan worden zonder dat de ruisspanning groter wordt dan die zou ontstaan als u slechts één transistor gebruikt. Is de optimale bronbelasting voor één transistor 200 Ω, dan kunt u de parallelle schakeling voeden uit een bron met een impedantie van ongeveer 100 Ω en toch niet meer ruis genereren.

Meer transistoren parallel schakelen
Natuurlijk kunt u dit principe uitbreiden. Zet u vier identieke transistoren parallel, dan zal de ruis bij optimale bronimpedantie met een factor vier dalen. Voedt u de schakeling met een bron die een belasting heeft van een vierde van de optimale waarde, dan zal de totale ruis toch slechts ongeveer gelijk worden aan deze die ontstaat bij één transistor die optimaal gestuurd wordt.
Op deze manier kunt u dus schakelingen ontwerpen die gestuurd kunnen worden uit bronnen met een zeer lage impedantie en die een zeer lage spanning genereren, zonder dat de ruis te groot wordt.

Praktische schema's van parallel-versterkers

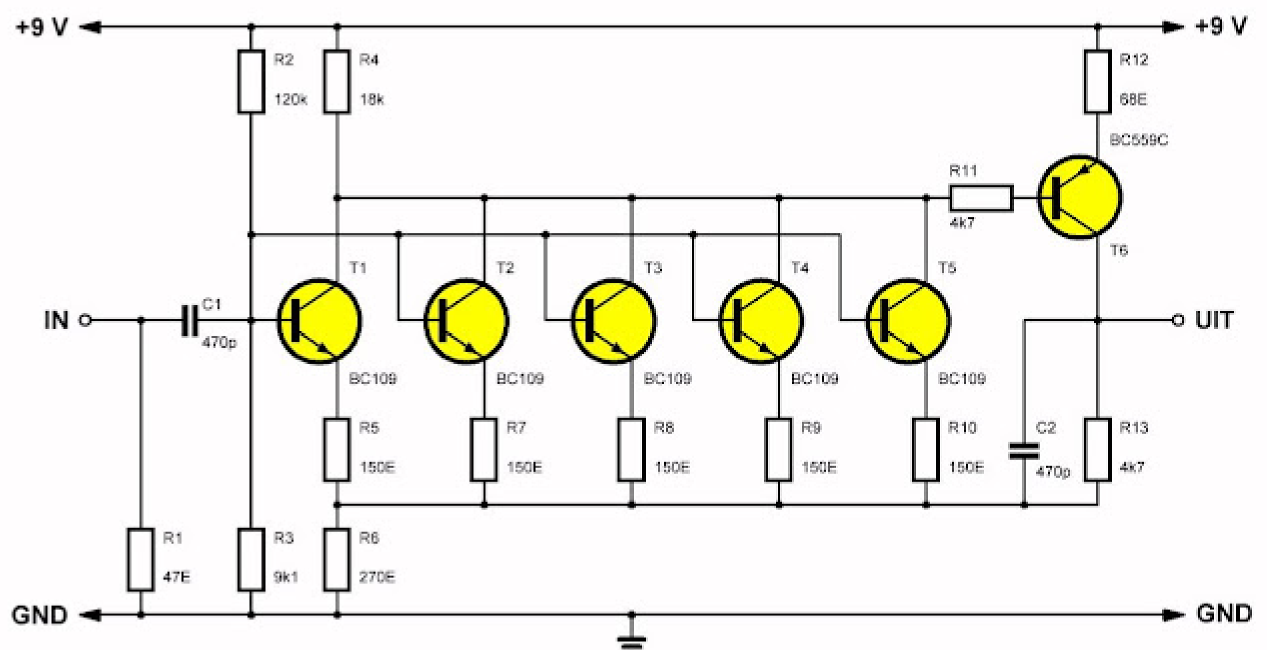
Het eerste praktisch schema
In de onderstaande figuur is een voorbeeld van een praktisch bruikbare parallel-versterker getekend. Er wordt gebruik gemaakt van vijf identieke transistoren van het type ZTX331 van Zetex Semiconductors. Dat zijn geselecteerde transistoren met een zeer lage eigen ruis, speciaal ontwikkeld voor dit soort toepassingen. Helaas is deze halfgeleider op dit moment niet erg goed verkrijgbaar.
Alle basissen en collectoren worden doorverbonden. De collectorstromen worden ingesteld door middel van de spanningsdeler naar de gemeenschappelijke basis en gestabiliseerd via de individuele emitterweerstanden. Deze zijn door middel van forse condensatoren ontkoppeld, zodat de tegenkoppeling alleen werkt voor gelijkspanningen.
De keuze van de transistoren en de collectorstromen legt de optimale impedantie van de bron vast op 75 Ω. Bij deze impedantie bedraagt de ruis op de uitgang van de schakeling slechts 67 µV in de frequentieband van 15 Hz tot 300 kHz. De schakeling versterkt 70 keer en heeft

een bandbreedte van 7 Hz tot 2,5 MHz.
Het signaal over de gemeenschappelijke collectorweerstand wordt door middel van een extra schakeling nog eens versterkt. De collectorweerstand van deze trap is opgesplitst, de twee knooppunten worden gebruikt voor een tweede vorm van tegenkoppeling ter stabilisatie van het geheel.



Een parallel-versterker voor een bronimpedantie van 75 Ω en met een eigen ruis op de uitgang van slechts 67 µV. (© 2019 Jos Verstraten)

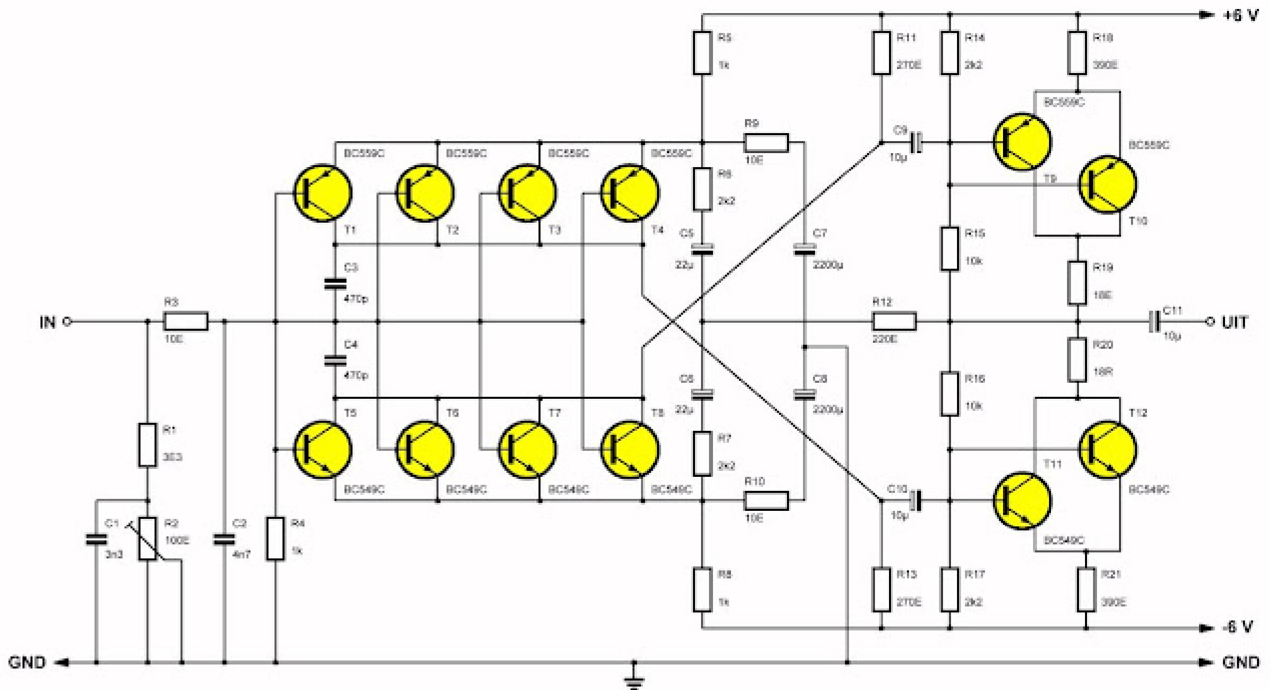
Het tweede praktisch schema
In de onderstaande figuur is een vrijwel identieke schakeling getekend met de bekende Europese complementaire low-noise transistoren BC109 en BC179. Ook bij deze schakeling zorgen de individuele emitterweerstanden voor de stabilisatie van de collectorstromen.



Een vrijwel identieke schakeling met Europese transistoren. (© 2019 Jos Verstraten)

Parallel en complementair
U kunt de prestaties van een parallel-versterker verbeteren door de schakeling complementair uit te voeren. Er ontstaat dan een schakeling zoals voorgesteld in de onderstaande figuur. Twaalf transistoren voor een versterkingsfactor van slechts 25! Het

voordeel van de complementaire samenstelling is dat de basissen op 0 V kunnen worden ingesteld, zodat een rechtstreekse koppeling tussen de signaalbron en de versterker mogelijk is. U moet de potentiometer R2 afregelen op de juiste waarde van de bronimpedantie. Waarden tussen 3 Ω en 100 Ω zijn mogelijk. De signaal/ruis-verhouding van de schakeling bedraagt 71 dB, een extreem goede waarde voor transistorversterkers! De bandbreedte is kaarsrecht tussen 20 Hz en 48 kHz. Dank zij de sterke tegenkoppeling van de uitgang naar de emitters via R12 bedraagt de totale harmonische vervorming slechts 0,0015 % bij een ingangssignaal van 150 µV. Bij een ingangsspanning van 30 mV stijgt de vervorming tot 0,015 %.



Een volledig symmetrisch uitgewerkte parallel-versterker met extreem lage eigen ruis en vervorming. (© 2019 Jos Verstraten)

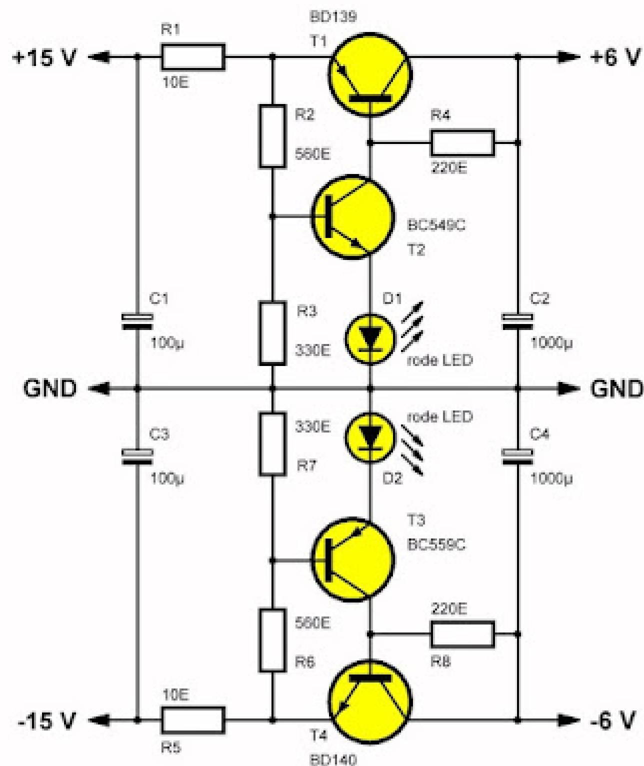
De voeding voor parallel-versterkers

Hoge eisen aan ruis en brom

Vanwege de zeer kleine ingangssignalen die verwerkt worden moet u hoge eisen stellen aan de voeding. Ook op voedingsspanningen zit namelijk ruis en het zou jammer zijn als deze ruis via de instelweerstanden tot de parallel-versterker zou doordringen. Zenerdioden om de voedingsspanning te stabiliseren zijn absoluut verboden! Zenerdioden staan immers in sper ingesteld en produceren dus per definitie heel wat ruis. Ook spanningsregelaars zoals de 78xx- en 79xx-series worden afgeraden. Ook deze onderdelen zijn niet ontworpen op minimale ruis op de uitgangsspanning.

Een voorbeeld van een goede voeding

In de onderstaande figuur is een niet alledaags schema van een goede gestabiliseerde voeding voor parallel-versterkers getekend. Als referentie-element wordt gebruik gemaakt van de rode LED's D1 en D2! Een rode LED heeft een constante brandspanning van 1,65 V waarop erg weinig ruis is terug te vinden. Deze referentie wordt opgenomen in een versterkertje, die de brandspanning oppept tot 6 V. Uiteraard is de voeding symmetrisch uitgevoerd, zodat u ook complementaire versterkers kunt voeden.
De ingangsklemmen worden gestuurd uit ongestabiliseerde spanningen van ±15 V.



Een ruisarme gestabiliseerde voeding. (© 2019 Jos Verstraten)

Algemene opmerking over moving coil elementen

Als u een parallel-versterkers gebruikt voor het afsluiten van een moving coil element mag u niet vergeten dat u ook deze elementen volgens de RIAA-norm in frequentie moet compenseren. Het zal duidelijk zijn dat het niet mogelijk is deze frequentie compensatie rechtstreeks in te bouwen in de parallel-versterker. Deze wordt immers ontworpen met minimale ruis als uitgangspunt. Vandaar dat u altijd deze schakeling moet afsluiten met een versterker met RIAA-netwerk. Deze versterker moet dan uiteraard niet erg veel versterken, omdat een deel van de totale versterking reeds door de parallelle schakeling werd verzorgd. U kunt dus flink tegenkoppelen waardoor de eigenschappen van de RIAA-correctie verbeterd worden.